

На правах рукописи



Кандрина Юлия Александровна

ИЗУЧЕНИЕ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В СЕРЕ И СОЕДИНЕНИЯХ
ТИПА AB ($A = Cd, Zn$; $B = S, Se$) ПРИ ДАВЛЕНИЯХ 20 – 50 ГПа
МЕТОДОМ ИМПЕДАНСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

01.04.07 – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург-2010

Работа выполнена на кафедре физики низких температур ГОУ ВПО
«Уральский государственный университет им. А.М. Горького».

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,
профессор

Бабушкин Алексей Николаевич

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор, член-корреспондент РАН

Хохлов Дмитрий Ремович

доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник

Германенко Александр Викторович

Ведущая организация:

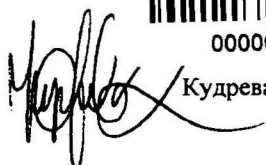
ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный
университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина»

Защита состоится 9 декабря 2010 г. в 15 часов на заседании диссертационного
совета Д 212.286.01 по защите докторских и кандидатских диссертаций при
ГОУ ВПО «Уральский государственный университет им. А.М. Горького» по
адресу: 620000, г. Екатеринбург, пр. Ленина, 51, комн. 248.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ГОУ ВПО
«Уральский государственный университет им. А.М. Горького».

Автореферат разослан «8» ноября 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук, с.н.с.



НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ



0000681156

Кудреватых Н.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Серу, сульфиды и селениды кадмия и цинка объединяет сложность фазовых диаграмм и трудности в объяснении процессов формирования новых состояний при высоких давлениях. Несмотря на большое количество экспериментальных данных о структурных превращениях в этих материалах, окончательное понимание процессов формирования фаз высокого давления, в том числе – устойчивых при нормальном давлении, отсутствует.

Поведение серы при высоких давлениях представляет интерес в связи с очень сложной фазовой диаграммой этого материала, возникновением полимерных фаз, влиянием на свойства предыстории образца. В сере в интервале 5 – 50 ГПа наблюдается целый ряд структурных превращений, в том числе обратимая аморфизация с последующим переходом в кристаллическое состояние.

Исследования, проведенные при высоких давлениях, показали наличие у сульфидов и селенидов кадмия и цинка перехода из фазы низкого давления со структурой типа вюрцита (CdS , $CdSe$) или сфалерита (ZnS , $ZnSe$) в фазу высокого давления со структурой типа каменной соли, сопровождающегося резким снижением электросопротивления.

Сульфиды и селениды кадмия и цинка интенсивно исследуются, в частности, в связи с формированием на их основе нанокристаллических систем с уникальными оптическими и электрическими характеристиками.

В условиях давлений, превышающих 10 ГПа и реализуемых в камерах высокого давления с алмазными наковальнями различных конструкций, образец по разным причинам (возникновение смеси фаз и межфазных границ, распределение механических напряжений, наличие электрических контактов и др.) неоднороден, и поэтому стоит задача выделения различных вкладов в общую электропроводность образца.

Для изучения электрических свойств неоднородных материалов используют, в частности, метод полного комплексного сопротивления (импедансную спектроскопию), позволяющий из отклика материала на внешнее

переменное электрическое поле извлечь вклады, связанные собственно с электропроводностью разных фаз, границами между фазами, электродными процессами, электрической поляризацией в объеме, вкладом измерительной ячейки и т.п. Однако при исследованиях материалов при высоких давлениях из-за сложности интерпретации результатов этот метод широкого применения до сих пор не нашел.

В связи с этим использование метода импедансной спектроскопии для исследования особенностей фазовых превращений при высоких давлениях в сере и соединениях типа AB ($A = Cd, Zn$; $B = S, Se$) представляется актуальным.

Работа выполнена при частичной поддержке программы «Фундаментальные исследования и высшее образование» (грант № $EK-005-X1$) Американского фонда гражданских исследований ($CRDF$), Министерства образования и науки РФ и Правительства Свердловской области в рамках Уральского научно-образовательного центра «Перспективные материалы», грантов РФФИ (№ 01-03-96494-р2001 Урал, № 02-02-27197з, № 05-02-26721з, № 09-02-01316), программы «Научные и педагогические кадры инновационной России» (ГК № П645).

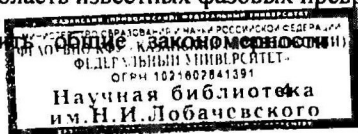
Целью работы является выявление методами импедансной спектроскопии в условиях высоких давлений особенностей поведения электрических характеристик серы и соединений типа AB ($A = Cd, Zn$; $B = S, Se$).

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

– проанализировать методические особенности применения метода импедансной спектроскопии для исследования материалов в условиях высоких давлений при использовании камер высокого давления с алмазными наковальнями типа «закругленный конус – плоскость»;

– исследовать полное комплексное сопротивление серы, сульфидов и селенидов кадмия и цинка при давлениях 20 – 50 ГПа при комнатной температуре в широком диапазоне частот электрического поля, обратив особое внимание на область известных фазовых превращений;

– установить закон изменения влияния высокого давления на



электрические свойства изученных материалов и выявить связь особенностей электрических свойств с известными структурными превращениями.

Научная новизна работы состоит в том, что

– показана применимость метода импедансной спектроскопии в условиях высоких давлений при использовании камер высокого давления с алмазными наковальнями;

– впервые показано, что при переходе серы из аморфного в кристаллическое состояние при 37 ГПа в материале возникает спонтанная поляризация, проявляющаяся как «индуктивный» вклад в полное комплексное сопротивление (эффект «отрицательной» емкости).

– показано, что электрические свойства серы, сульфидов и селенидов кадмия и цинка при высоких давлениях на переменном токе коррелируют с данными исследований на постоянном токе и данными структурных исследований.

На защиту выносятся:

– результаты впервые проведенных систематических исследований частотных зависимостей полного комплексного сопротивления серы, сульфидов и селенидов кадмия и цинка, коррелирующие с данными исследований на постоянном токе и данными структурных исследований;

– утверждение, что при давлении около 37 ГПа (по данным структурных исследований – область начала перехода из аморфной фазы в кристаллическую фазу высокого давления) в сере возникает новое состояние с внутренней поляризацией, проявляющейся как «индуктивный» вклад в полное комплексное сопротивление или эффект «отрицательной» емкости.

Практическая ценность работы. В сере при давлениях выше 37 ГПа возникает новое состояние с внутренней поляризацией, проявляющейся как «индуктивный» вклад в полное комплексное сопротивление или эффект «отрицательной» емкости. Сведения о фазовых превращениях в сере, сульфидах и селенидах кадмия и цинка при высоких давлениях могут быть полезны в разработке полупроводниковых датчиков давления.

Достоверность результатов обеспечивается использованием в работе надежных, неоднократно апробированных экспериментальных методов; использованием при интерпретации результатов современных представлений физики высоких давлений и физики конденсированного состояния; корреляцией экспериментальных данных, полученных в данной работе, с данными, полученными другими авторами.

Личный вклад автора состоит в отработке методики измерений, проведении детальных экспериментальных исследований, интерпретации полученных результатов.

Публикации и апробация работы. Основные результаты диссертации опубликованы в 4 статьях и в 17 тезисах международных и российских конференций (Международной конференции “Фазовые переходы и критические явления в конденсированных средах” (Махачкала, 2007); V – VI, IX Межгосударственных семинарах “Структурные основы модификации материалов методами нетрадиционных технологий” (Обнинск, 1999, 2001, 2007, 2009); 8-й международном симпозиуме OMA-2005 “Фазовые превращения в твердых растворах и сплавах” (Сочи, 2005); Российской конференции “Фазовые превращения при высоких давлениях” (Черноголовка, 2000); 9-ой, 10-ой, 11-ой международных конференциях “Высокие давления” (Украина, Судак, 2006, 2008, 2010); 3 и 4 High Pressure School On Chemistry, Biology, Materials Science and Techniques (Warsaw, 1999, 2001); XVI Уральской международной зимней школе по физике полупроводников (Екатеринбург, 2006, 2010); Joint 21st AIRAPT and 45th EHPRG International Conference on High Pressure Science and Technology (Catania, Italy, 2007); XLVIIth EHPRG Conference on High Pressure Science and Technology (Paris, 2009); 48th EHPRG International Conference on High Pressure Science and Technology (Uppsala, Sweden, 2010)).

Структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав и заключения. Объем диссертационной работы 124 страниц, в том числе 58 рисунков. Список цитируемой литературы содержит 132 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности проведенных исследований, постановку целей и вытекающих из них экспериментальных задач, формулировку основных научных положений и результатов, выносимых на защиту.

Первая глава «Фазовые диаграммы и электрические и физические свойства серы, сульфидов и селенидов кадмия и цинка при высоких давлениях» посвящена обсуждению известных результатов оптических, структурных и электрических исследований свойств серы, сульфидов и селенидов кадмия и цинка.

Обзор показал, что свойства серы, сульфидов и селенидов цинка и кадмия хорошо изучены при нормальных и высоких давлениях в широком интервале температур на постоянном токе, и все исследованные материалы при повышении давления переходят в состояния с относительно высокой проводимостью.

При этом рост давления до 50 ГПа приводит к необратимым изменениям кристаллической и электронной структуры соединений ZnS , $ZnSe$, CdS [10-11]. В $CdSe$ наблюдаются индуцированные давлением обратимые переходы в фазу с более высокой проводимостью [12]. Эти переходы сопровождаются гистерезисом.

Несмотря на большое количество экспериментальных данных о структурных превращениях в сере и сульфидах и селенидах кадмия и цинка, окончательного понимания процессов формирования в этих материалах фаз высокого давления нет. Причиной этого могут быть сложность соблюдения в разных исследованиях одинаковых условий, связанных с однородностью образца, распределением механических напряжений, влиянием межфазных границ. На основании проведенного анализа литературных данных поставлены задачи исследований и определены экспериментальные особенности их решения.

Во второй главе «Применение метода полного комплексного сопротивления для исследования электрофизических свойств материалов в алмазных камерах высокого давления «закругленный конус – плоскость»» рассмотрены особенности применения метода импедансной спектроскопии [1] при высоких давлениях. Для создания давлений использовали камеру высокого давления с наковальнями типа «закругленный конус – плоскость», выполненными из искусственных поликристаллических алмазов карбонадо, впервые предложенными Е.Н. Яковлевым, Л.Ф. Верещагиным с соавторами [2].

Измерения полной проводимости проводили при комнатной температуре в диапазоне частот 1 Гц – 100 кГц на измерителе импеданса *FRA-1174* (*Solartron Electronic Group*) с интерфейсом *ECI-1186*. Используемая методика позволяет изучать один и тот же образец при последовательном увеличении и снижении давления, выдерживать под нагрузкой длительное время. Типичные размеры образца – диаметр около 0,2 мм, толщина примерно 20 мкм.

При анализе экспериментальных результатов необходимо учитывать собственный импеданс камеры высокого давления, зависящий от частоты переменного тока. Для оценки этого вклада в измеряемые характеристики проведены предварительные измерения на модельных объектах: «идеальном» проводнике и «идеальном» диэлектрике.

В первом случае наковальни замыкали накоротко (в качестве образца брали алюминиевую фольгу), а во втором – взаимно изолировали наковальни (в качестве изолирующего материала использовали бумагу). Толщины фольги и бумаги (15 – 20 мкм) соответствовали характерным размерам изучаемых образцов. Это позволило определить импеданс собственно ячейки и пути его учета при исследовании материалов.

В третьей главе «Полное комплексное сопротивление серы при давлениях 20 – 50 ГПа на частотах переменного тока 1 Гц – 100 кГц» приведены экспериментальные результаты, полученные на образцах серы квалификации ОСЧ 14-4, и их интерпретация.

Независимые исследования при комнатной температуре показали, что в сере в области давлений 5 – 50 ГПа происходит целый ряд структурных превращений [3-7]. Исходные образцы серы имеют орторомбическую структуру, переходящую в моноклинную фазу при 5 ГПа. Последняя сохраняется до 24 ГПа. При давлениях ~25 ГПа появляется аморфная фаза [3]. После 37 ГПа начинается перекристаллизация из аморфной фазы [4] и наблюдается переход в кристаллическую фазу высокого давления [5-7].

На рис. 1 представлены годографы импеданса экспериментальной ячейки с образцом серы при увеличении давления. Числа на графиках указывают частоту переменного тока, а стрелки – направление увеличения частоты.

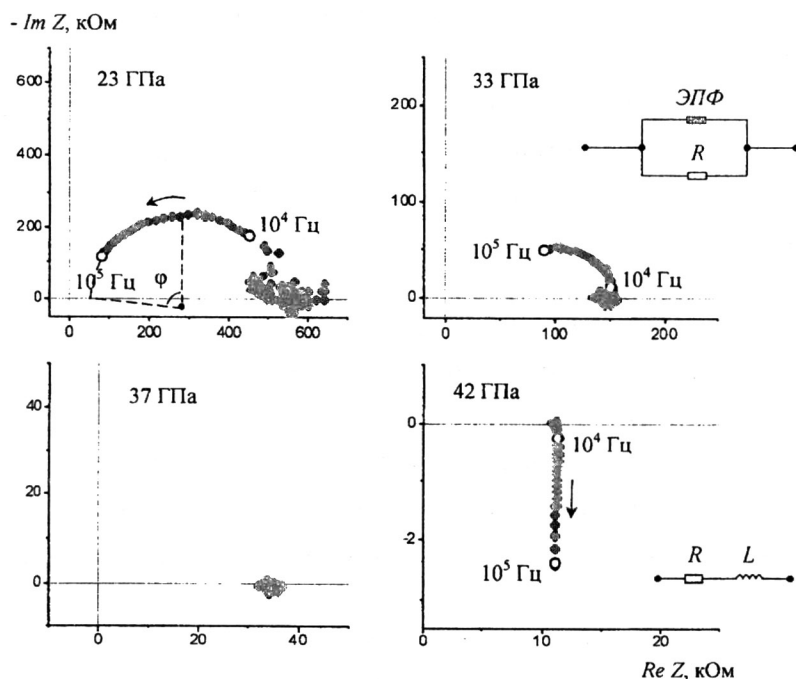


Рис. 1. Годографы импеданса экспериментальной ячейки с образцом серы

При давлениях 23 – 35 ГПа годограф импеданса представляет собой дугу полуокружности, отсекающую высокочастотной частью некоторое сопротивление. Именно в этой области давлений существует аморфная фаза серы.

Центры окружностей дуг сдвинуты вниз относительно оси абсцисс, что может быть связано с особенностями переноса заряда и массы в образце, структуры поверхности контактов, межфазными границами и т.п. Для описания таких процессов используется понятие элемента с постоянным фазовым углом (ЭПФ), проводимость которого описывается выражением $Y = B(i2\pi f)^\alpha$, где f – частота переменного тока, B и α – константы. α – показатель степени элемента с постоянным фазовым углом, $\alpha = 2\varphi/\pi$, φ – фазовый угол, (рис. 1). Величина α в общем случае принимает значения от -1 (идеальная индуктивность) до 1 (идеальная емкость), значение $\alpha = 0$ соответствует идеальному активному сопротивлению.

С увеличением давления дуга полуокружности годографа импеданса укорачивается и исчезает около 37 ГПа, в спектре импеданса остается только вклад, определяемый не зависящим от частоты активным сопротивлением. Именно при давлении ~37 ГПа, по данным структурных исследований [5-7], происходит фазовый переход в кристаллическую фазу высокого давления.

На рис. 2 сопоставлены результаты измерений на постоянном [8] и на переменном токе. Из измерений на постоянном токе известно, что при увеличении давления сопротивление серы монотонно уменьшается. Энергия активации проводимости в интервале давлений 28 – 40 ГПа и при температурах 250 – 370 К уменьшается, а при давлениях выше 40 ГПа – резко возрастает. Из измерений на переменном токе мы обнаружили, что сопротивление серы уменьшается с ростом давления, наклон барической зависимости сопротивления резко уменьшается при ~ 37 ГПа.

При давлениях ~ 37 ГПа знак сдвига фаз между током и напряжением скачком изменяется, проявляется «индуктивный» вклад в полное комплексное сопротивление (эффект «отрицательной» емкости), (рис. 2, в).

Сжимаемый образец становится источником зарядов, стекающих на электроды. Это является косвенным свидетельством возникновения в сере спонтанной поляризации при давлениях выше 37 ГПа.

При снижении давления дуга полукружности годографа импеданса появляется при давлениях ~ 33 ГПа, образец возвращается в неполяризованную фазу. Во всех последующих циклах увеличения и снижения давления (на одном и том же и разных образцах) вид и характер изменения годографов повторяются.

Особенности годографов импеданса, обнаруженные при давлениях около 37 ГПа на переменном токе, коррелируют с данными предшествующих исследований термоэдс и электропроводности серы на постоянном токе [8].

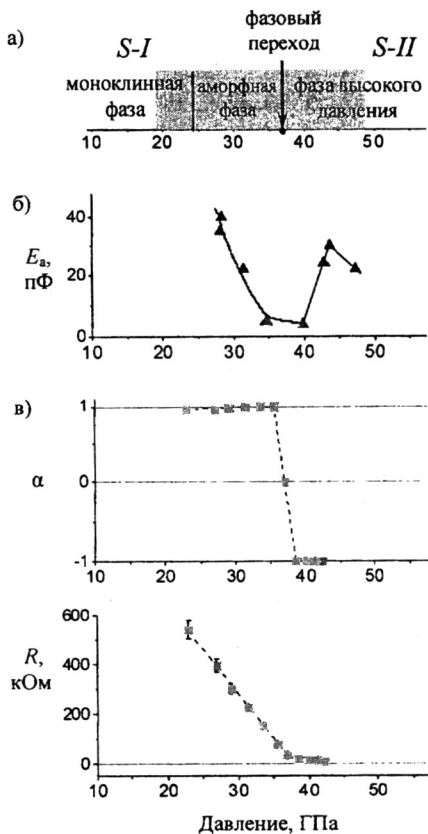


Рис. 2. а) Фрагмент фазовой диаграммы серы при комнатной температуре (заштрихованная область – давления, при которых проводились измерения) б) Барическая зависимость энергии активации проводимости серы на постоянном токе [8] в) Барические зависимости показателя степени элемента с постоянным фазовым углом и сопротивления (без вклада ячейки) серы на переменном токе

Приведенные в четвертой главе «Применение импедансной спектроскопии для изучения электрофизических свойств CdS , $CdSe$, ZnS , $ZnSe$

при высоких давлениях» основные результаты могут быть сформулированы следующим образом.

Независимые структурные исследования при комнатной температуре показали [9], что в ZnS при давлении ~ 15 ГПа происходит фазовый переход из структуры цинковой обманки в $NaCl$ структуру. При давлениях ~ 65 ГПа структура $NaCl$ испытывает переход в структуру типа $Cmcm$ (искаженная $NaCl$ структура).

Из измерений на постоянном токе известно [10], что в интервале давлений 41 – 47 ГПа сопротивление ZnS имеет максимум, а энергия активации проводимости резко возрастает (рис. 3, а). На этом же графике приведены барические зависимости показателя степени элемента с постоянным фазовым углом и емкости экспериментальной ячейки с образцом ZnS на переменном токе (рис. 3, б).

Наибольшее изменение величин показателя степени элемента постоянной фазы и емкости происходит при давлении ~ 45 ГПа, на постоянном токе при этом давлении наблюдаются рост электрического сопротивления образца и скачок энергии активации проводимости. Эти эффекты могут быть связаны с изменением внутренней электрической

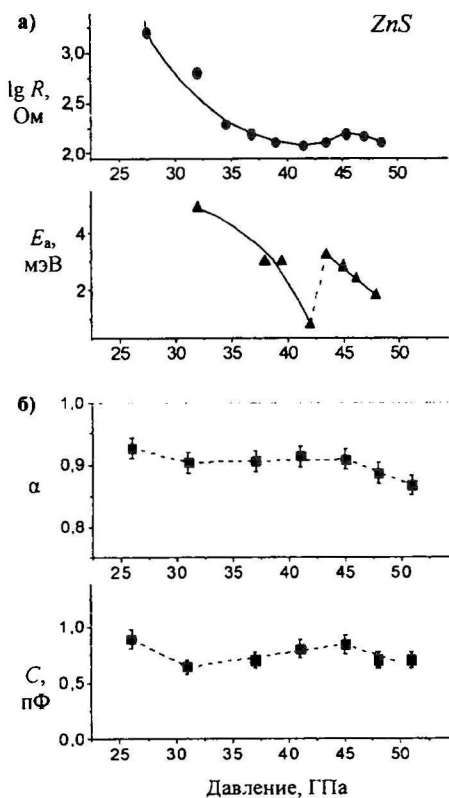


Рис. 3. а) Барические зависимости сопротивления и энергии активации проводимости ZnS на постоянном токе [10]. б) Барические зависимости показателя степени элемента с постоянным фазовым углом и емкости ячейки с образцом ZnS на переменном токе

поляризации, противодействующей движению носителей заряда.

В CdS при ~ 2 ГПа происходит фазовый переход из структуры α в $NaCl$ структуру. При 51 ГПа происходит фазовый переход в $Cmcm$ структуру [9].

Из измерений на постоянном токе [11] известно, что зависимости сопротивления и энергии активации проводимости CdS от давления имеют сложный характер (рис. 4, а).

Барическая зависимость сопротивления CdS имеет максимум при 31 ГПа. На этом же графике приведены барические зависимости показателя степени элемента с постоянным фазовым углом и емкости ячейки с образцом CdS (рис. 4, б). Показатель степени элемента с постоянным фазовым углом и емкость изменяются с особенностями при давлениях ~ 31 ГПа и ~ 48 ГПа.

Поляризация проявляется при давлении ~ 31 ГПа, на постоянном токе при этом давлении наблюдается резкий рост электрического сопротивления образца. Возрастание показателя степени элемента с постоянным фазовым углом и емкости при давлениях 48 – 51 ГПа может быть связано с началом известного фазового перехода [9].

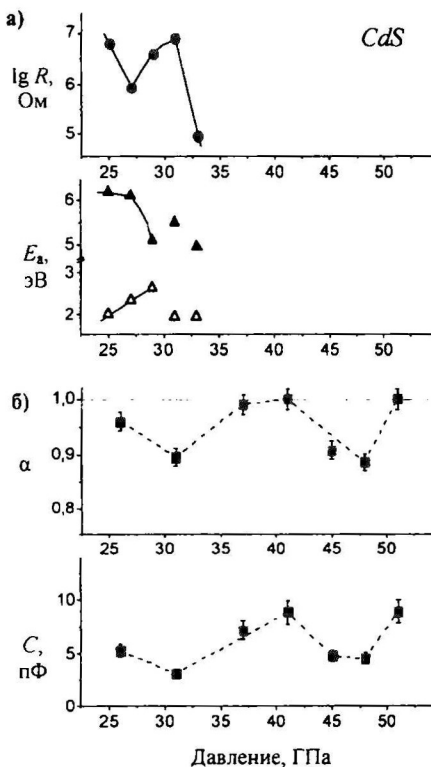


Рис. 4. а) Барические зависимости сопротивления и энергии активации проводимости CdS на постоянном токе [11]. б) Барические зависимости показателя степени элемента с постоянным фазовым углом и емкости ячейки с образцом CdS на переменном токе

В *ZnSe* при ~ 13 ГПа происходит фазовый переход из структуры цинковой обманки в *NaCl* структуру. Непрерывный, хотя и очень медленный, переход из структуры *NaCl* в структуру *Cmcm* обнаружили при ~ 30 ГПа, дальнейшее искажение возможно при давлениях выше 48 ГПа [9].

Из измерений на постоянном токе известно, что энергия активации проводимости *ZnSe* уменьшается с ростом давления в интервале 20 – 35 ГПа (рис. 5, а). При давлениях выше 35 ГПа резко уменьшается ширина запрещенной зоны. В *ZnSe* при давлениях 35 – 50 ГПа наблюдается металлоподобная фаза.

На этом же графике приведены барические зависимости показателя степени элемента с постоянным фазовым углом и емкости ячейки с образцом *ZnSe* (рис. 5, б). Показатель степени элемента с постоянным фазовым углом уменьшается с давлением до 45 ГПа, а потом возрастает. Наблюдается быстрый рост емкости при давлениях выше 40 ГПа.

В *CdSe* при ~ 2 ГПа происходит фазовый переход из структуры

вюрцита в *NaCl* структуру. Обнаружен непрерывный переход в упорядоченную *Cmcm* структуру около 27 ГПа и возможное дальнейшее искажение около 36 ГПа [9].

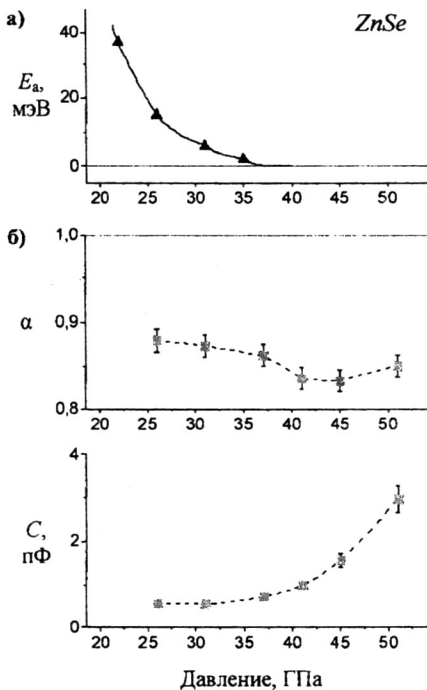


Рис. 5. а) Барическая зависимость энергии активации проводимости *ZnSe* на постоянном токе.

б) Барические зависимости показателя степени элемента с постоянным фазовым углом и емкости ячейки с образцом *ZnSe* на переменном токе

Из измерений на постоянном токе [12] известно, что энергия активации проводимости *CdSe* уменьшается с увеличением давления в интервале 20 – 35 ГПа, при давлениях выше 40 ГПа начинает возрастать (рис. 6, а). В этом же интервале давлений наблюдаются особенности в поведении барической зависимости показателя степени элемента с постоянным фазовым углом, характеризующего, в частности, процессы, связанные с переносом заряда и массы через границы со сложной структурой (рис. 6, б).

Рост показателя степени элемента с постоянным фазовым углом и емкости с давлением свидетельствует об увеличении распределенного емкостного вклада

в полную проводимость образца, что может быть связано с увеличением площади межзеренных границ в пределах одной кристаллической фазы. Площадь межзеренных границ, по нашим оценкам, в *CdS* увеличивается не менее чем в 2 раза, в *ZnSe* – 5 раз, в *CdSe* – в 6 раз.

Если в образце *CdSe* при давлениях до ~ 35 ГПа показатель степени элемента с постоянным фазовым углом и емкость практически не зависят от давления, то при более высоких давлениях наблюдается их быстрый рост. То есть именно при ~ 35 – 37 ГПа начинаются изменения, связанные, вероятно, с увеличением площади межзеренных границ. Рост энергии активации

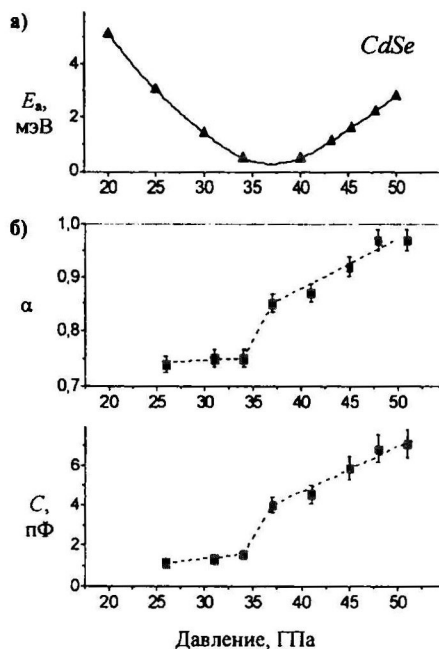


Рис. 6. а) Барическая зависимость энергии активации проводимости *CdSe* на постоянном токе [12].

б) Барические зависимости показателя степени элемента с постоянным фазовым углом и емкости ячейки с образцом *CdSe* на переменном токе

проводимости, обнаруженный ранее, в этом случае может быть объяснен увеличением роли дефектов в общей проводимости образца.

Показатель степени элемента с постоянным фазовым углом характеризует процессы, связанные с изменением переноса электрического заряда через межфазные границы при изменении давления.

В соединениях ZnS (при давлениях 20 – 50 ГПа) и $ZnSe$ (при давлениях 20 – 40 ГПа) с исходной кристаллической структурой типа цинковой обманки (сфалерита) с ростом давления общая площадь межзеренных границ в пределах одной фазы уменьшается. В соединениях CdS и $CdSe$ (при давлениях 20 – 50 ГПа) с исходной кристаллической структурой типа вюрцита с ростом давления общая площадь межзеренных границ в пределах одной фазы увеличивается.

В сульфидах и селенидах кадмия и цинка рост и уменьшение дисперсности (т.е. и общей площади межзеренных границ в пределах одной фазы) связаны с исходной кристаллической структурой исследованных материалов.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Проведен детальный анализ возможности применения метода импедансной спектроскопии для исследования материалов в условиях высоких давлений при использовании камер высокого давления с алмазными наковальнями.
2. Показано, что при давлениях около 37 ГПа (по данным структурных исследований – область начала перехода из аморфной фазы в кристаллическую фазу высокого давления) в сере возникает новое состояние с внутренней поляризацией, проявляющейся как «индуктивный» вклад в полное комплексное сопротивление или эффект «отрицательной» емкости.
3. Показано, что при фазовых превращениях в CdS (при давлениях ~ 31 ГПа и ~ 48 ГПа), в $ZnSe$ (~ 40 ГПа), в $CdSe$ (~ 35 ГПа) существенно возрастает распределенный емкостной вклад в полную проводимость образца,

свидетельствующий об увеличении под действием высокого давления площади межзеренных границ в пределах одной кристаллической фазы.

4. Показано, что электрические свойства серы, сульфидов и селенидов кадмия и цинка при высоких давлениях на переменном токе коррелируют с данными исследований на постоянном токе и данными структурных исследований.

Список цитируемой литературы

1. Стойнов З.Б., Графов Б.М., Савова-Стойнова Б., Елкин В.В. Электрохимический импеданс / М.: Наука, 1991, с. 30-36.
2. Верещагин Л.Ф., Яковлев Е.Н., Степанов Т.Н., Бибаев К.Х., Виноградов Б.В. Давление 2,5 мегабара в наковальнях, изготовленных из алмаза типа карбонадо // Письма в ЖЭТФ, 1972, Т. 16, № 4, с. 240-242.
3. Luo H. and Ruoff A.L. X-ray-diffraction study of sulfur to 32 GPa: Amorphization at 25 GPa // Phys. Rev B, 1993, V. 48, № 1, p. 569-572.
4. Luo H., Greene R.G., and Ruoff A.L. β -Po Phase of Sulfur at 162 GPa: X-Ray Diffraction Study to 212 GPa // Phys. Rev. Lett, 1993, V. 71, № 18, p. 2943-2946.
5. C. Hejny, L.F. Lundegaard, S. Falcony, ahn M.I. McMahon Incommensurate sulfur above 100 GPa, Phys. Rev. B, 2005, V. 71, p. 020101.
6. Fujihisa H., Acahama Y., Kawamura H., Yamawaki H., Sakashita M., Yamada T., Honda K., and Bihan T. Le Spiral chain structure of high pressure selenium-II and sulfur-II from powder x-ray diffraction // Phys. Rev. B, 2004, V. 70, p. 134106.
7. O. Degtyareva Crystal structure of simple metals at high pressures // High Pres. Res., 2010, V. 30, № 3, p. 343-371.
8. Бабушкина Г.В., Кобелев Л.Я., Бабушкин А.Н. Электрические свойства серы при сверхвысоких давлениях вблизи температуры полимеризации // Высокомол. Соед, 1988, Т.(Б) 30, № 9, с. 643-644.
9. Mujica A., Rubio A., Munoz A., Needs R.J. High-pressure phases of group-IV, III-V, and II-VI compounds // Reviews of Modern Physics, 2003, V. 75, p. 864-907.

10. *Бабушкин А.Н.* Электропроводность и термоэдс фазы высокого давления сульфида цинка // ФТТ, 1992, Т.34, № 6, с. 1647-1649.
11. *Бабушкин А.Н., Бабушкина Г.В., Урицкий З.И., Кобелев Л.Я.* Электропроводность сульфида кадмия при давлениях выше 25 ГПа // Неорганические материалы, 1991, Т. 27, № 6, с. 1147-1150.
12. *Игнатченко О.А., Бабушкин А.Н.* Электропроводность и термоэдс фазы высокого давления селенида кадмия в области вероятного перехода полупроводник-металл // ФТТ, 1993, Т. 35, № 8, с. 2231-2234.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

Статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, определенных ВАК:

1. *Гуничева Ю.А., Бабушкин А.Н., Волкова Я.Ю., Игнатченко О.А.* Релаксация диэлектрических свойств серы при сверхвысоких давлениях // Неорганические материалы, 2000, Т. 36, № 2, с. 191-193.
2. *Гуничева Ю.А., Бабушкин А.Н., Шкерин С.Н.* Исследование электрофизических свойств серы при сверхвысоких давлениях методом импедансной спектроскопии // Неорганические материалы, 2001, Т. 37, № 7, с. 796-799.

Статьи в научных журналах:

3. *Кандрина Ю.А., Бабушкин А.Н.* Исследование электрофизических свойств CdS при высоких давлениях методом импедансной спектроскопии // Неорганические материалы, 2008, Т. 44, № 5, с. 532-534.
4. *Babushkin A.N., Kandrina Y.A., Kobleva O.L., Schkerin S.N., Volkova Y.Y.* Impedance spectroscopy at superhigh pressures. Phase transitions and metastable states // *Frontiers of High Pressure Research II: Application of High Pressure to Low-Dimensional Novel Electronic Materials.* Eds. H.D. Hochheimer, B. Kuchta, P.K. Dorhout, J.L. Yarger, Kluwer Acad. Publ., Dordrecht-New York-London, 2001, p. 131-141.

Тезисы российских и международных конференций:

5. *Гуничева Ю.А., Бабушкин А.Н., Волкова Я.Ю.* Релаксационные процессы в сере при сверхвысоких давлениях // V Межгосударственный семинар "Структурные основы модификации материалов методами нетрадиционных технологий (МНТ-V)", Обнинск, 14-17 июня, 1999, Тез. конф. с. 50.

6. *Gunicheva Y.A., Babushkin A.N., Volkova Y.Y.* Relaxation processes in sulphur under high pressure // 3th High Pressure School On Chemistry, Biology, Materials Science and Techniques, 1999, Warsaw, abstract <http://www.unipress.waw.pl/ihaps/>.

7. *Гуничева Ю.А., Бабушкин А.Н.* Применение метода электрической импедансной спектроскопии при исследовании электрофизических свойств серы под сверхвысоким давлением // Российская конференция "Фазовые превращения при высоких давлениях". Черноголовка, 13-15 июня, 2000, Тез. конф., с. 164.

8. *Кандрина Ю.А., Бабушкин А.Н., Шкерин С.Н.* Применение импедансной спектроскопии при сверхвысоких давлениях: электрофизические свойства серы // VI Межгосударственный семинар "Структурные основы модификации материалов методами нетрадиционных технологий (МНТ – VI)", Обнинск, 12-15 июня, 2001, Тез. конф., с. 68-69.

9. *Kandrina Y.A., Babushkin A.N., Shkerin S.N.* Application of the ac impedance spectroscopy at high pressures: electrophysical properties of sulfur // 4th High Pressure School On Chemistry, Biology, Materials Science and Techniques, 22-25 June, 2001, Warsaw, abstract <http://www.unipress.waw.pl/ihaps/>.

10. *Кандрина Ю.А., Бабушкин А.Н.* Применение метода импедансной спектроскопии при высоких давлениях. Электрофизические свойства сульфида кадмия // 8-й международный симпозиум ОМА – 2005, Фазовые превращения в твердых растворах и сплавах, Сочи, 12-16 сентября, 2005, Тез. конф. с. 228-229.

11. *Кандрина Ю.А., Бабушкин А.Н.* Исследование электрофизических свойств сульфида кадмия при высоких давлениях методом импедансной спектроскопии // XVI Уральская международная зимняя школа по физике полупроводников, Екатеринбург, с 27 февраля по 4 марта, 2006, Тез. конф., с. 174.

12. **Кандрина Ю.А., Бабушкин А.Н.** Электрические свойства CdS при высоких давлениях: метод импедансной спектроскопии // 9-я Международная конференция. Высокие давления – 2006, Судак, Крым, Украина, 17-23 сентября, 2006, Тез. конф., с. 17.
13. **Kandrina Yu. A., Babushkin A.N.** Electrical Properties of CdSe at High Pressures: An Impedance Spectroscopy Study // Joint 21st AIRAPT and 45th EHPRG International Conference on High Pressure Science and Technology, Catania, Italy, September 17-21, 2007, book of abstracts, p. 282-283.
14. **Кандрина Ю.А., Бабушкин А.Н.** Электрические свойства селенида кадмия при высоких давлениях. Метод импедансной спектроскопии // IX Международный семинар “Структурные основы модификации материалов методами нетрадиционных технологий (МНТ–IX)”, Обнинск, 12-16 июня, 2007, Тез. конф. с. 76-77.
15. **Кандрина Ю.А., Бабушкин А.Н.** Исследование электрофизических свойств селенида кадмия при высоких давлениях методом импедансной спектроскопии // Международная конференция “Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсированных средах”, Махачкала, 12-15 сентября, 2007, Тез. конф. с. 447-448.
16. **Кандрина Ю.А., Бабушкин А.Н.** Применение метода импедансной спектроскопии при высоких давлениях. Электрофизические свойства ZnS // Тезисы 10-й Международной конференции Высокие давления – 2008, Национальная академия наук Украины, Донецкий физико-технический институт, Судак, Крым, 16-20 сентября, 2008, Тез. конф. с. 166.
17. **Кандрина Ю.А., Бабушкин А.Н.** Применение метода импедансной спектроскопии при высоких давлениях. Электрофизические свойства ZnS // X Международный семинар “Структурные основы модификации материалов методами нетрадиционных технологий (МНТ–X)”, Обнинск, 16-19 июня, 2009, Тез. конф. с. 94-96.

18. *Kandrina Yu. A., Babushkin A.N.* Electrical properties of ZnS at high pressures: an impedance spectroscopy study // XLVIIth EHPRG Conference, Paris, 2009, book of abstracts, p. 249.
19. *Кандрина Ю.А., Бабушкин А.Н.* Электрофизические свойства ZnSe. Применение метода импедансной диэлектрической спектроскопии при высоких давлениях // XVIII Уральская международная зимняя школа по физике полупроводников, Екатеринбург, 15-20 февраля, 2010, Тез. конф., стр. 262.
20. *Kandrina Yu. A., Babushkin A.N.* Electrical properties of ZnSe at high pressures: an impedance spectroscopy study // 48th EHPRG International Conference, Uppsala (Sweden), 25-29 July, 2010, book of abstracts, p. 164.
21. *Кандрина Ю.А., Бабушкин А.Н.* Электрофизические свойства ZnSe. Применение метода импедансной спектроскопии при высоких давлениях // Тезисы 11-ой Международной конференции Высокие давления – 2010, Национальная академия наук Украины, Донецкий физико-технический институт, Судак, Крым, 26-30 сентября, 2010, Тез. конф. стр. 43.

Подписано в печать 27.10.2010. Формат 60х84/16
Гарнитура «Times». Усл. печ. л. 1,6.
Тираж 100 экз. Заказ № 164

Отпечатано в типографии ИПЦ «Издательство УрГУ»
620000, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4

